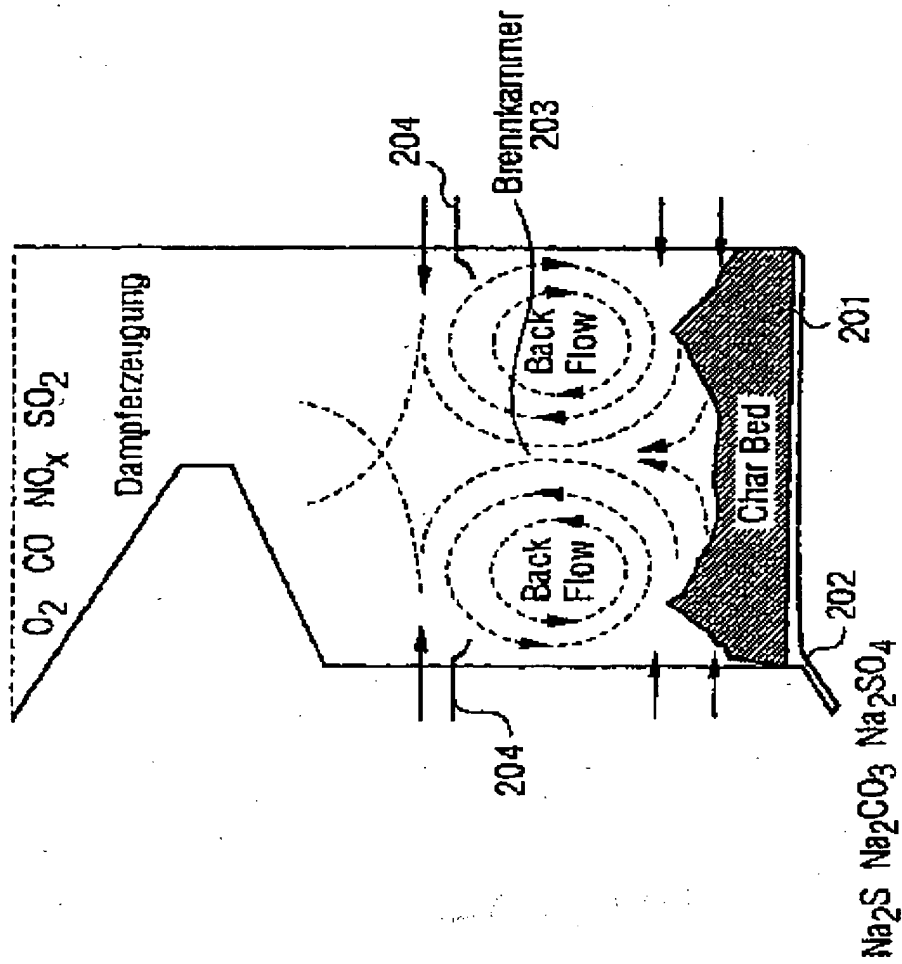


AN: PAT 2000-412445
TI: Technical system design method adjusting dimension figure
to achieve maximum quality and using equivalent model to plan
system
PN: WO200033146-A1
PD: 08.06.2000
AB: The method involves describing measurement data of a given
system using an equivalent model. A dimension figure is
determined for the quality of the equivalent model by comparing
the measurement data with the data determined by the equivalent
model. Adjustments are made to the equivalent model to achieve
as high quality as possible. The adjusted equivalent model is
used to design the technical system. The equivalent model may
be a regression model. The quality is determined based on a
quadratic deviation of the measurement data from the data
determined by the equivalent model.; USE - For large industrial
systems, e.g. recovery boiler. ADVANTAGE - Method allows
technical system to be planned based on measurement data from
given system.
PA: (SIEI) SIEMENS AG;
IN: SCHAEFFLER S; STURM T;
FA: WO200033146-A1 08.06.2000; DE59904896-G 08.05.2003;
DE19855873-A1 15.06.2000; EP1157311-A1 28.11.2001;
EP1157311-B1 02.04.2003;
CO: AT; BE; CH; CY; DE; DK; EP; ES; FI; FR; GB; GR; IE; IT; LI;
LU; MC; NL; PT; SE; US; WO;
DN: US;
DR: AT; BE; CH; CY; DE; DK; ES; FI; FR; GB; GR; IE; IT; LU; MC;
NL; PT; SE; LI;
IC: G05B-013/04; G05B-017/02; G05B-023/02;
MC: T01-J15; T06-A07B; T06-A08;
DC: T01; T06;
FN: 2000412445.gif
PR: DE1055873 03.12.1998;
FP: 08.06.2000
UP: 20.05.2003

This Page Blank (uspto)



This Page Blank (uspto)



⑮ **BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT**

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 198 55 873 A 1**

⑤① Int. Cl.⁷:
G 05 B 17/00
G 05 B 13/04

⑦① Aktenzeichen: 198 55 873.2
⑦② Anmeldetag: 3. 12. 1998
⑦④ Offenlegungstag: 15. 6. 2000

DE 198 55 873 A 1

⑦① Anmelder:
Siemens AG, 80333 München, DE

⑦② Erfinder:
Schäffler, Stefan, Dr., 86199 Augsburg, DE; Sturm,
Thomas, Dr., 81673 München, DE

⑤⑥ Entgegenhaltungen:
DE 197 11 484 C1
DE 296 17 200 U1
US 56 61 669 A
WO 98 27 474 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤④ Verfahren und Anordnung zum Entwurf eines technischen Systems

⑤⑦ Zur Lösung der Aufgabe wird ein Verfahren zum Entwurf eines technischen Systems angegeben, bei dem Meßdaten eines vorgegebenen Systems anhand eines Ersatzmodells beschrieben werden. Es wird eine Maßzahl für die Güte des Ersatzmodells ermittelt, indem die Meßdaten des vorgegebenen Systems mit durch das Ersatzmodell bestimmten Daten verglichen werden. Anhand der Maßzahl für die Güte wird das Ersatzmodell dahingehend angepaßt, daß es eine möglichst hohe Güte aufweist. Das hinsichtlich seiner Güte angepaßte Ersatzmodell wird zum Entwurf des technischen Systems eingesetzt.

DE 198 55 873 A 1

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Anordnung zum Entwurf eines technischen Systems.

Ein Systemverhalten eines technischen Systems, z. B. einer verfahrenstechnischen Anlage oder eines Systems der Großindustrie, hängt von zahlreichen Parametern ab. Im Rahmen eines Entwurfs solche eines Systems, also insbesondere beim Neuentwurf oder bei der Anpassung bzw. Einstellung eines bereits bestehenden Systems, sind Vorbedingungen, z. B. hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit oder der Umweltbelastung des Systems, einzuhalten. Jede Vorbedingung wird als eine Zielfunktion formuliert, die zu optimieren im Hinblick auf die anderen Zielfunktionen allgemeines Bestreben ist.

Die Aufgabe der Erfindung besteht darin, den Entwurf eines technischen Systems anhand von Meßdaten eines vorgegebenen Systems zu ermöglichen. Gerade im Hinblick auf eine Optimierung des bestehenden Systems bzw. auf einen optimierten Neuentwurf eines Systems ist eine derartige Nutzung bekannter Meßdaten von großer Bedeutung.

Diese Aufgabe wird gemäß den Merkmalen der unabhängigen Patentansprüche gelöst. Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich auch aus den abhängigen Ansprüchen.

Zur Lösung der Aufgabe wird ein Verfahren zum Entwurf eines technischen Systems angegeben, bei dem Meßdaten eines vorgegebenen Systems anhand eines Ersatzmodells beschrieben werden. Es wird eine Maßzahl für die Güte des Ersatzmodells ermittelt, indem die Meßdaten des vorgegebenen Systems mit durch das Ersatzmodell bestimmten Daten verglichen werden. Anhand der Maßzahl für die Güte wird das Ersatzmodell dahingehend angepaßt, daß es eine möglichst hohe Güte aufweist. Das hinsichtlich seiner Güte angepaßte Ersatzmodell wird zum Entwurf des technischen Systems eingesetzt.

Die aus vielen unterschiedlichen realisierten Systemen vorliegenden Meßdaten werden zur Beschreibung des Ersatzmodells eingesetzt. Mit dem Ersatzmodell wird versucht, das vorgegebene System möglichst gut nachzubilden. Die Maßzahl für die Güte der Nachbildung wird ermittelt, indem die realen Meßdaten mit den Daten, die anhand des Ersatzmodells gewonnen werden, verglichen werden. Eine große Differenz zwischen den Meßdaten und den Daten des Ersatzmodells entspricht einer schlechten Güte, also einer schlechten Abbildung des vorgegebenen Systems in das Ersatzmodell. Durch die Maßzahl für die Güte wird das Ersatzmodell dahingehend angepaßt, daß die Güte selbst möglichst hoch wird und somit das Ersatzmodell das vorgegebene System möglichst gut beschreibt. Das so gewonnene Ersatzmodell mit hoher Güte wird zum Entwurf des technischen Systems eingesetzt.

Unter Entwurf werden allgemein verstanden sowohl der Neuentwurf eines technischen Systems als auch die Anpassung bzw. Adaption eines bereits vorhandenen technischen Systems. Eine Weiterbildung besteht darin, daß das Ersatzmodell ein Regressionsmodell ist. Das Regressionsmodell geht von der Beschreibung

$$y_i = f_\beta(x_i) + e_i$$

aus, wobei
(y_i, x_i) vorgegebene Wertepaare,
 f_β eine Funktion, die von einem Parameter β abhängt und
 e_i einen Fehler
bezeichnen.

Nun ist der Fehler (als Funktion von β) zu minimieren:

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = \varphi(\beta).$$

Geht man von folgendem Beispiel

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + e$$

aus, so ist der funktionale Zusammenhang quadratischer Ordnung, das Regressionsmodell (Funktion, abhängig von β) hingegen ist linear.

Die Güte kann in einer anderen Weiterbildung anhand einer quadratischen Abweichung der Meßdaten von den durch das Ersatzmodell bestimmten Daten ermittelt werden. Die Anpassung des Ersatzmodells erfolgt durch Minimierung der quadratischen Abweichung.

Eine Ausgestaltung besteht darin, daß die Meßdaten nach ihrer Güte, bezogen auf deren Abweichung von den durch das Ersatzmodell bestimmten Daten, sortiert werden und eine vorgegebene Anzahl von $n\%$ schlechtesten Meßdaten aussortiert werden. Es wird also eine Güte für jedes Meßdatum bestimmt, wobei die Menge der Meßdaten, vorzugsweise in Form einer Liste, nach ihrer Güte sortiert und die $n\%$ schlechtesten bzw. die n schlechtesten Meßdaten aussortiert werden. Insbesondere ist zu prüfen, ob die $n\%$ bzw. die n schlechtesten Meßdaten in einem zusammenhängenden Bereich liegen. Ist dies der Fall, so werden diese Meßdaten nicht aussortiert, da sie mit hoher Wahrscheinlichkeit keine Meßfehler, sondern einen zusammenhängenden Bereich bestimmen, der durch das Ersatzmodell nicht ausreichend genau abgebildet wurde.

Eine andere Weiterbildung besteht darin, daß die Meßdaten einer Vorverarbeitung unterzogen werden. Da in einem realen vorgegebenen System eine große Menge an Meßdaten pro Zeiteinheit anfallen, ist es sinnvoll, diese Meßdaten einer Vorverarbeitung zu unterziehen und somit zu gewährleisten, daß weitgehend signifikante Meßdaten in die Bildung des Ersatzmodells einfließen. Bevorzugt findet die Vorverarbeitung in einer Reduktion der Anzahl von Meßdaten ihre Ausprägung.

Dabei werden die Meßdaten entsprechend vorgegebener Kriterien in Klassen eingeteilt. Die Meßwerte einer Klasse

werden bewertet und diejenigen Meßwerte, deren Bewertung unterhalb eines vorgegebenen ersten Schwellwertes liegt, werden aussortiert. Durch die Aussortierung der Meßwerte ergibt sich eine Reduktion hinsichtlich der Anzahl der Meßwerte. Somit liegen für eine Weiterverarbeitung eine deutlich reduzierte Anzahl von Meßwerten vor. Die Weiterverarbeitung kann mit gegenüber der nicht reduzierten Anzahl von Meßwerten geringerem Rechenaufwand erfolgen.

Auch können die Klassen selbst bewertet werden. Insbesondere kann eine Klasse, deren Bewertung unterhalb eines vorgegebenen zweiten Schwellwertes liegt, aussortiert werden. Hierdurch ergibt sich eine zusätzliche Reduktion der Anzahl der Meßwerte. 5

Eine andere Weiterbildung der Vorverarbeitung besteht darin, daß ein Kriterium für die Klasseneinteilung darin besteht, daß pro Klasse Meßwerte zu einer Vorgabe von Einstellparametern des technischen Systems bestimmt werden. Typischerweise wird das technische System anhand einer vorgegebenen Anzahl von Einstellparametern eingestellt, nach Einstellung erfolgt eine (zumeist zeitverzögerte) Reaktion des Systems auf die Einstellparameter (Einschwingverhalten, Einschwingvorgang des Systems). Nach Einstellung werden somit eine bestimmte Menge an Meßwerten aufgenommen, die dem Einschwingvorgang zugeordnet werden können, wobei nach abgeschlossenem Einschwingvorgang (Übergang in den stationären Betrieb) weiterhin Meßwerte anfallen, die dem vorgegebenen Satz Einstellparameter zugeordnet werden. Durch Verstellung der Einstellparameter wird eine neue Klasse bestimmt. Alle Meßwerte, die jeweils nach einer Verstellung der Einstellparameter anfallen, gehören in eine eigene Klasse. 10 15

Zusätzlich können Meßwerte einer Klasse, die dem jeweiligen Einschwingvorgang zuordenbar sind, aussortiert werden.

Weiterhin können fehlerhafte Meßwerte aussortiert werden. Die Einstellung großer technischer Systeme ist in vielen Fällen auf einen langfristigen stationären Betrieb ausgerichtet. Meßwerte, die sich auf den Einschwingvorgang (von kurzer Dauer im Verhältnis zum stationären Betrieb nach abgeschlossenem Einschwingvorgang) beziehen, werden sinnvoll aussortiert, da durch sie Meßwerte für den stationären Betrieb verfälscht werden. Insbesondere im Rahmen einer Modellierung des technischen Systems, sind die Meßdaten des stationären Verhaltens des technischen Systems interessant. 20

Eine Ausgestaltung besteht darin, die Anzahl der Meßwerte in einer Klasse dadurch zu reduzieren, daß mindestens ein repräsentativer Wert für die Meßwerte der Klasse bestimmt wird. Solch ein repräsentativer Wert kann sein: 25

- a) ein Mittelwert (z. B. ein gleitender Mittelwert) der Meßwerte der Klasse,
- b) ein Maximalwert der Meßwerte der Klasse,
- c) ein Minimalwert der Meßwerte der Klasse,
- d) ein Median.

30

Bei Variante d) liegt ein Vorteil darin, daß immer ein Wert bestimmbar ist, den es tatsächlich gibt, wohingegen der Mittelwert a) selbst nicht als Wert vorkommt.

Je nach Anwendungsfall, kann eine geeignete Wahl zur Bestimmung des repräsentativen Werts einer Klasse erfolgen.

Eine ganze Klasse mit Meßwerten kann aussortiert werden, wenn diese weniger als eine vorgegebene Anzahl Meßwerte enthält. 35

Eine andere Ausgestaltung besteht darin, daß diejenigen Meßwerte aussortiert werden, die um mehr als einen vorgegebenen Schwellwert von einem vorgebbaren Wert verschieden sind. Der vorgebbare Wert kann ein Mittelwert aller Meßwerte der Klasse oder ein zu erwartender Meßwert auf die jeweiligen Einstellparameter des technischen Systems sein. 40

Im Rahmen einer anderen Weiterbildung werden die mittels Entwurf gewonnenen Daten zur Steuerung einer technischen Anlage eingesetzt. Zusätzlich kann die Steuerung der technischen Anlage zur Laufzeit des Systems, also Online, erfolgen.

Auch wird zur Lösung der Aufgabe eine Anordnung zum Entwurf eines technischen Systems angegeben, die eine Prozessoreinheit aufweist, welche Prozessoreinheit derart eingerichtet ist, daß Meßdaten eines vorgegebenen Systems anhand eines Ersatzmodells beschreibbar sind. Eine Maßzahl für die Güte des Ersatzmodells ist ermittelbar, indem die Meßdaten des vorgegebenen Systems mit durch das Ersatzmodell bestimmten Daten verglichen werden. Aus der Maßzahl für die Güte ist das Ersatzmodell dahingehend anpaßbar, daß es eine möglichst hohe Güte aufweist. Das hinsichtlich seiner Güte angepaßte Ersatzmodell ist zum Entwurf des technischen Systems einsetzbar. 45

Diese Anordnung ist insbesondere geeignet zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens oder einer seiner vorstehend erläuterten Weiterbildungen. 50

Ausführungsbeispiele der Erfindung werden nachfolgend anhand der Zeichnung dargestellt und erläutert.

Es zeigen

Fig. 1 ein Blockdiagramm, das Schritte eines Verfahrens zum Entwurf eines technischen Systems enthält;

Fig. 2 eine schematische Skizze eines Recovery-Boilers;

Fig. 3-5 Eingangsgrößen, Stellgrößen und Ausgangsgrößen des Recovery-Boilers. 55

In **Fig. 1** ist ein Blockdiagramm dargestellt, das Schritte eines Verfahrens zum Entwurf eines technischen Systems enthält. In einem Schritt **101** wird anhand von Meßdaten ein Ersatzmodell gebildet. Bevorzugt ist dieses Ersatzmodell ein Regressionsmodell. Um das in Schritt **101** entstandene Ersatzmodell auf die Meßdaten anzupassen, also eine Verfeinerung des Ersatzmodells vorzunehmen, so daß die Meßdaten das Ersatzmodell in ausreichender Näherung beschreiben, wird in einem Schritt **102** eine Maßzahl für die Güte des Ersatzmodells bestimmt. Diese Maßzahl wird bestimmt, indem die Meßdaten des vorgegebenen Systems mit durch das Ersatzmodell bestimmten Daten verglichen werden. Bevorzugt erhält jedes Meßdatum eine Maßzahl für die Güte, welche Maßzahl die Abweichung des Meßdatums mit dem zugehörigen von dem Ersatzmodell bestimmten Wert kennzeichnet. Die Summe aller Maßzahlen für die Güte für alle Meßdaten bestimmt eine Gesamtgüte für das Ersatzmodell. In einem Schritt **103** wird die Güte maximiert, indem die Maßzahl für die Güte (bzw. eine negative Güte für die Übereinstimmung des Ersatzmodells mit dem vorgegebenen System) minimiert wird. Ist eine entsprechend hohe Güte für das Ersatzmodell bestimmt, so wird in einem Schritt **104** dieses Ersatzmodell für den Entwurf des technischen Systems eingesetzt. Der Entwurf kann sowohl ein Neuentwurf (vgl. Schritt **105**) oder 60 65

eine Anpassung eines schon bestehenden technischen Systems (vgl. Schritt 106) sein.

Fig. 2 zeigt eine schematische Skizze eines Recovery-Boilers. Nachfolgend wird anhand des Beispiels "Recovery-Boiler" ein Ausführungsbeispiel des oben beschriebenen Verfahrens veranschaulicht.

In der Papier- und Zellstoffindustrie werden zum Aufschluß von Zellstoff verschiedene Chemikalien sowie Wärme und Elektroenergie benötigt. Aus einer eingedeckten Prozeßablauge (Schwarzlauge) lassen sich mit Hilfe des Recovery-Boilers die verwendeten Chemikalien und zusätzlich Wärmeenergie zurückgewinnen. Ein Grad für die Zurückgewinnung der Chemikalien ist von entscheidender Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage.

Die Schwarzlauge wird in einem Schmelzbett 201 verbrannt. Dabei bildet sich eine Alkalischemelze, die über eine Leitung 202 abfließt. Aus den Bestandteilen der Alkalischemelze werden in weiteren Verfahrensschritten die eingesetzten Chemikalien zurückgewonnen. Frei gewordene Verbrennungswärme wird zur Erzeugung von Wasserdampf genutzt. Die Verbrennung der Abflauge und damit die Rückgewinnung der Chemikalien beginnt mit der Zerstäubung der Schwarzlauge über Zerstäuberdüsen 204 in eine Brennkammer 203. Partikel der zerstäubten Schwarzlauge werden bei ihrem Fall durch das heiße Rauchgas getrocknet. Die getrockneten Laugenpartikel fallen auf das Schmelzbett 201, wobei eine erste Verbrennung und eine chemische Reduktion stattfinden. Flüchtige Bestandteile und Reaktionsprodukte gelangen in eine Oxidationszone, in der oxidierende Reaktionen ablaufen und in der die Verbrennung abgeschlossen wird.

Wichtige Zielvorgaben für die Steuerung des Recovery-Boilers sind die Dampfproduktion zur Energiegewinnung, die Einhaltung von Emissionswerten unter Umweltsichtspunkten und die Effizienz der chemischen Reduktion.

Der Verbrennungsvorgang, und damit die Zielvorgaben, werden insbesondere durch die Luftzufuhr in drei Ebenen (Primary Air (PA), Secondary Air (SA), Tertiary Air (TA)) gesteuert. Der Gesamtprozeß unterliegt zahlreichen Einflüssen, die bei der Modellierung zu berücksichtigen sind:

- a) Die Messung der Größen unterliegen oftmals starken Schwankungen;
- b) Es existieren nicht gemessene und nicht meßbare Einflußgrößen;
- c) Bei jeder Änderung der einstellbaren Parameter kommt es zu Einschwingvorgängen;
- d) Die technische Anlage verschmutzt und wird in vorgegebenen Abständen gereinigt, wodurch im Systemverhalten jeweils ein zeitlicher Drift bewirkt wird.

Die gemessenen Größen des Gesamtprozesses werden in Eingangsgrößen (vgl. Fig. 3) und Ausgangsgrößen (vgl. Fig. 5) unterteilt. Jede Minute werden Meßwerte abgespeichert. Vier der Eingangsgrößen sind gleichzeitig auch Stellgrößen (auch: einstellbare Parameter; vgl. Fig. 4). Die Stellgrößen sind im wesentlichen als unabhängig voneinander einstellbare freie Parameter des Gesamtprozesses anzusehen. Einige der anderen Eingangsgrößen sind von den Stellgrößen mehr oder minder abhängig. Gemäß einer Vorgabe sind beim Recovery-Boiler die Größen "BL Front Pressure" und "BL Back Pressure" stets gleich zu regeln. Die vier Stellgrößen (vgl. Fig. 4) sind vorzugsweise abzuspeichern als Stellgrößen (mit dem gewünschten, voreingestellten Wert) und als Eingangsgrößen (mit dem gemessenen, realen Wert).

Beim Recovery-Boiler besteht eine Problemstellung darin, in Abhängigkeit von den einstellbaren Parametern bestimmte Zielvorgaben, die über gemessene Größen definiert werden, zu erfüllen. Hier wird eine dreistufige Vorgehensweise zur Lösung des Problems gewählt:

1. Die zu betrachtenden Zielvorgaben werden durch stochastische Methoden modelliert, wobei diese Modelle durch neue Messungen aktualisiert werden (datengetriebene, empirische Modellierung). Dabei ist es sinnvoll, nicht nur ein einziges Modell zu verwenden, sondern globale Modelle für die Identifikation interessanter Gebiete in einem durch die Zielvorgaben bestimmten Parameterraum und lokale Modelle zur exakten Berechnung optimaler Arbeitspunkte einzusetzen. Die verwendeten Modelle werden durch Gütemaße bewertet.
2. Falls die betrachteten Modelle aufgrund der Datenlage nicht hinreichend genau sind (Gütemaße), werden gezielt neue Arbeitspunkte zur Modellverbesserung ausgewertet (Experimental Design). Ferner werden durch Verwendung globaler stochastischer Optimierungsverfahren bzgl. der Zielvorgaben attraktive Gebiete in Abhängigkeit vom aktuellen globalen Modell identifiziert.
3. Für die lokale Optimierung werden lokale Modelle konstruiert und die zur Verfügung stehenden Datensätze gegebenenfalls gezielt erweitert (Experimental Design).

Bei den Zielvorgaben handelt es sich um physikalisch-technische bzw. betriebswirtschaftliche Kriterien, die in der Regel Randbedingungen und/oder Sicherheitsbedingungen entsprechen müssen. Häufig sind mehrere dieser Kriterien gleichzeitig zu betrachten. Die Verwendung eines stochastischen Modells kann insbesondere dazu verwendet werden, die zu optimierenden Zielgrößen und ihre Abhängigkeit von den einzustellenden Parametern im Rechner zu simulieren. Dies ist dann notwendig, wenn Messungen sehr kostenintensiv bzw. sehr zeitaufwendig sind. Bei Sicherheitsanforderungen können mögliche Gefahrensituationen vermieden werden.

Beim Recovery-Boiler ist eine Online-Optimierung, die auf mehreren Daten basiert, notwendig, weil die physikalisch-chemischen Prozesse nicht mit ausreichender Genauigkeit quantitativ modelliert werden können und weil das Verhalten der Anlage im Verlauf des Betriebs Schwankungen unterliegt. Das Wissen über dieses Verhalten muß stetig durch gezielte Wahl neuer Arbeitspunkte erweitert werden. Daher empfiehlt sich im Rahmen der Online-Optimierung das bereits beschriebene dreistufige Vorgehen der stochastischen Modellierung und der mathematischen Optimierung.

BESCHREIBUNG DER EINGANGSGRÖßEN

Die a Eingangsgrößen ($a \in \mathbb{N}$, \mathbb{N} : Menge der natürlichen Zahlen) sind im allgemeinen von n Stellgrößen $n \in \mathbb{N}$ und von Zufallseffekten abhängig. Sie können wie folgt beschrieben werden:
Es seien $(\Omega, \mathcal{S}, \mathbb{P})$ ein Wahrscheinlichkeitsraum und \mathcal{B}^v eine Borelsche σ -Algebra über \mathbb{R}^v (\mathbb{R} : Menge der reellen Zahlen) für jedes $v \in \mathbb{N}$. Die Eingangsgrößen werden über eine $\mathbb{B}^n \times \mathcal{S} - \mathcal{B}^a$ -meßbare Abbildung φ dargestellt:

$$\varphi: \mathbb{R}^n \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}^a \quad (1).$$

Die Definitionsmenge der Abbildung j ist ein kartesisches Produkt zweier Mengen. Betrachtet man die jeweiligen Projektionen auf die Einzelmengen, so erhält man folgende Abbildungen:

$$\varphi_x: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^a, \omega \rightarrow \varphi(x, \omega) \text{ für alle } x \in \mathbb{R}^n \quad (2),$$

$$\varphi^\omega: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^a, x \rightarrow \varphi(x, \omega) \text{ für alle } (\omega \in \Omega) \quad (3).$$

$\{\varphi_x; x \in \mathbb{R}^n\}$ ist ein stochastischer Prozeß mit einer Indexmenge \mathbb{R}^n und eine Abbildung φ^ω ist für jedes Ereignis $\omega \in \Omega$ ein Pfad dieses stochastischen Prozesses. 10

Beim Recovery-Boiler ist $n = 4$ und $a = 14$ (nach Elimination der Größe "BL Back Pressure").

Aufgrund der geforderten Meßbarkeit der Abbildung φ_x ist für jedes $x \in \mathbb{R}^n$ die Abbildung φ_x eine Zufallsvariable. Unter geeigneten Zusatzvoraussetzungen können Erwartungswerte und höhere Momente betrachtet werden. Dieser Zugang ermöglicht den Schritt von stochastischen Modellen zu deterministischen Optimierungsproblemen. Bei einem deterministischen Optimierungsproblem ist die Zielfunktion direkt mittels einer Variablen einstellbar, wohingegen die stochastische Größe die Zielfunktion beeinflusst, aber keine gezielte Einstellung ermöglicht. 15

BESCHREIBUNG DER AUSGANGSGRÖßEN

Das Prozeßmodell M des Recovery-Boilers wird als Funktion in Abhängigkeit von den Eingangsgrößen und weiteren Zufallseffekten beschrieben. Dabei sei (Ω, \mathcal{S}, P) der obige Wahrscheinlichkeitsraum. Das Prozeßmodell M ist dann eine $\mathbb{B}^a \times \mathcal{S} - \mathbb{B}^b$ -meßbare Abbildung: 20

$$M: \mathbb{R}^a \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}^b \quad (4),$$

wobei b die Anzahl der Ausgangsgrößen bezeichnet. 25

Da der Recovery-Boiler einem zyklischen zeitlichen Drift unterliegt (von Reinigungsphase zu Reinigungsphase), ist zudem eine Beschreibung mit einem Zeitparameter denkbar. Die Ausgangsgrößen lassen sich durch $\mathbb{B}^n \times \mathcal{S} - \mathbb{B}^b$ -meßbare Abbildungen ψ darstellen: 30

$$\psi: \mathbb{R}^n \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}^b \quad (5),$$

$$(x, \omega) \rightarrow M(\varphi(x, \omega), \omega) \quad (6).$$

Betrachtet man die jeweiligen Projektionen auf die Einzelmengen der Definitionsmenge, so erhält man folgende Abbildungen 35

$$\psi_x: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^b, \omega \rightarrow \psi(x, \omega) \text{ für alle } x \in \mathbb{R}^n \quad (7),$$

$$\psi^\omega: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^b, x \rightarrow \psi(x, \omega) \text{ für alle } \omega \in \Omega \quad (8).$$

$\{\psi_x; x \in \mathbb{R}^n\}$ ist ein stochastischer Prozeß mit einer Indexmenge \mathbb{R}^n und die Abbildung ψ^ω ist für jedes $\omega \in \Omega$ ein Pfad dieses stochastischen Prozesses. 40

Beim Recovery-Boiler ist $b = 15$. 45

Die Tatsache, daß bei der Definition von ψ zwischen den verwendeten Ereignissen ω nicht unterschieden wird, bedeutet keine Einschränkung, da Ω als kartesisches Produkt aus einem Ω_1 und einem Ω_2 dargestellt werden kann. Die obige Darstellung umfaßt somit auch das Modell:

$$\psi: \mathbb{R}^n \times \Omega_1 \times \Omega_2 \rightarrow \mathbb{R}^b \quad (9),$$

$$(x, \omega_1, \omega_2) \rightarrow M(\varphi(x, \omega_1), \omega_2) \quad (10).$$

BESCHREIBUNG DER ZUR VERFÜGUNG STEHENDEN DATENSÄTZE

Mit den Beschreibungen in den beiden vorangegangenen Abschnitten kann man die Eingangsgrößen und die Ausgangsgrößen gemeinsam zu Meßgrößen (= Meßdaten) Φ zusammenfassen. Φ ist eine $\mathbb{B}^n \times \mathcal{S} - \mathbb{B}^m$ -meßbare Abbildung mit $m = a + b$ und 55

$$\Phi: \mathbb{R}^n \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}^m \quad (11),$$

$$(x, \omega) \rightarrow \begin{pmatrix} \varphi(x, \omega) \\ \psi(x, \omega) \end{pmatrix} \quad (12).$$

Betrachtet man wieder die jeweiligen Projektionen auf die Einzelmengen der Definitionsmenge, so erhält man folgende Abbildungen: 65

$$\Phi_x : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^m, \omega \rightarrow \Phi(x, \omega) \text{ für alle } x \in \mathbb{R}^n \quad (13),$$

$$\Phi^\omega : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m, x \rightarrow \Phi(x, \omega) \text{ für alle } \omega \in \Omega \quad (14).$$

- 5 $\{\Phi_x; x \in \mathbb{R}^n\}$ ist ein stochastischer Prozeß mit einer Indexmenge \mathbb{R}^n und die Abbildung Φ^ω ist für jedes $\omega \in \Omega$ ein Pfad dieses stochastischen Prozesses.

Für jedes gewählte Stellgrößentupel x werden beim Recovery-Boiler viele Realisierungen von Φ_x ermittelt und abgespeichert, d. h. zu jedem $x_j \in \mathbb{R}^n$ werden zahlreiche Realisierungen

$$10 \quad \Phi_{jk} := \Phi(x_j, \omega_{jk}) \quad (15)$$

mit

$$\omega_{jk} \in \Omega; k = 1, 2, \dots, v_j;$$

$$15 \quad v_j \in \mathbb{N}; j = 1, 2, \dots, u; u \in \mathbb{N}$$

betrachtet. Die gespeicherten Datensätze D_{jk} des Recovery-Boilers sind also $(n + m)$ -Tupel:

$$20 \quad D_{jk} = \begin{pmatrix} x_j \\ \Phi_{jk} \end{pmatrix}, \quad k = 1, 2, \dots, v_j; \quad j = 1, 2, \dots, u \quad (16).$$

Dabei wird $D_{j_1 k_1}$ vor $D_{j_2 k_2}$ abgespeichert, wenn

$$25 \quad (j_1 < j_2) \vee ((j_1 = j_2) \wedge (k_1 < k_2))$$

gilt.

DATENKOMPRESSION DURCH KLASSENEINTEILUNG DER PARAMETER

30

Da für jedes Stellgrößentupel x im allgemeinen mehrere Realisierungen von Φ_x vorliegen, bietet sich aufgrund der komplexen stochastischen Eigenschaften des zu betrachtenden Prozesses als erster Schritt der statistischen Datenanalyse eine Klasseneinteilung der Parameter durch Bildung arithmetischer Mittelwerte an. Zudem werden offensichtlich fehlerhafte Datensätze ausgesondert. Ein offensichtlich fehlerhafter Datensatz ist bspw. eine physikalisch unmögliche Messung, der insbesondere aufgrund einer vorgenommenen Einstellung real gar nicht vorkommen kann.

35

Vorgehensweise:

1. Datensätze, bei denen die Größe "BL Front Pressure" ungleich der Größe "BL Back Pressure" ist, werden aus-
- 40 sortiert, da diese beiden Werte nach Vorgabe der Anlagensteuerung gleich sein müssen. Der Datenverlust ist sehr gering.
2. Die Datensätze werden auf Klassen aufgeteilt, in denen die vier Einstellparameter (PA, SA, TA, BL Front Pressure, siehe oben) zeitlich aufeinanderfolgend konstant sind, d. h. die j -te Klasse besteht aus den Datensätzen D_j .
3. Klassen, in denen sich weniger als 30 Datensätze befinden, werden ausgesondert, damit Einschwingvorgänge keinen großen Einfluß haben.
- 45 4. Für jede Klasse werden ein arithmetischer Mittelwert $\bar{\Phi}_j$ und eine empirische Standardabweichung s_j für alle Meßgrößen ermittelt:

$$50 \quad \bar{\Phi}_j = \frac{1}{v_j} \cdot \sum_{k=1}^{v_j} \Phi_{jk} \quad (17),$$

$$55 \quad s_j = \sqrt{\left(\frac{1}{v_j - 1} \cdot \sum_{k=1}^{v_j} \left(\Phi_{jk}^{(n)} - \bar{\Phi}_j^{(n)} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \\ 60 \quad \vdots \\ 65 \quad \sqrt{\left(\frac{1}{v_j - 1} \cdot \sum_{k=1}^{v_j} \left(\Phi_{jk}^{(m)} - \bar{\Phi}_j^{(m)} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (18).$$

5. Klassen bei denen die Mittelwerte für die Größen PA, SA, TA oder BL Front Pressure zu weit von den entsprechenden Einstellparametern entfernt sind, werden ausgesondert. Auf diesen Klassen konnten also die Einstellwerte nicht erreicht werden.

STATISTISCHE KENNZEICHEN FÜR DIE GEGEBENEN KLASSEN UND IHRE GRAPHISCHE DARSTELLUNG

Neben den arithmetischen Mittelwerten und den empirischen Standardabweichungen, die für die einzelnen Klassen bestimmt wurden, wird noch eine gemeinsame Standardabweichung s bestimmt gemäß

$$s = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{v-1} \cdot \sum_{j=1}^u (v_j - 1) s_j^{(1)2} \right)^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{1}{v-1} \cdot \sum_{j=1}^u (v_j - 1) s_j^{(m)2} \right)^{\frac{1}{2}}}} \quad (19)$$

Dabei steht u für die Anzahl der Klassen (hier 205) und v für die Summe der v_j , d. h. v ist die Anzahl aller verwendeten Meßwerte (hier 38915).

LINEARE REGRESSIONSMODELLE FÜR FUNKTIONSAPPROXIMATIONEN

Für jede Meßgröße (Meßdatum) $\Phi^{(i)}$ ($i = 1, 2, \dots, m$) wird, basierend auf dem arithmetischen Mittel über die Klassen, ein lineares Regressionsmodell in Abhängigkeit von der quadratischen Kombination der vier Einstellparameter berechnet. In der folgenden Darstellung ist $x \in \mathbb{R}^4$, wobei

$x^{(1)}$: Primary Air (PA)

$x^{(2)}$: Secondary Air (SA)

$x^{(3)}$: Tertiary Air (TA)

$x^{(4)}$: Black Liquor (BL) Front Pressure

gilt. $u \in \mathbb{N}$ bezeichnet die Anzahl der Klassen. Jede Meßgröße $\Phi^{(i)}$ wird durch

$$\Phi^{(i)}(x, \omega) = a_i^T r(x) + e_i(\omega) \quad (20)$$

mit $a_i \in \mathbb{R}^{15}$ modelliert. Dabei gelten

$$r: \mathbb{R}^4 \rightarrow \mathbb{R}^{15} \quad (21)$$

$$\begin{pmatrix} \zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4 \end{pmatrix}^T \rightarrow \begin{pmatrix} 1, \zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4, \zeta_1^2, \zeta_2^2, \zeta_3^2, \zeta_4^2, \\ \zeta_1\zeta_2, \zeta_1\zeta_3, \zeta_1\zeta_4, \zeta_2\zeta_3, \zeta_2\zeta_4, \zeta_3\zeta_4 \end{pmatrix}^T \quad (22),$$

d. h. Polynome zweiten Grades werden an die Meßdaten angepaßt, und

$$e_i: \Omega \rightarrow \mathbb{R} \quad (23)$$

ist eine Zufallsvariable mit Erwartungswert 0.

Der Vektor a_i wird mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt, allerdings werden statt der Originaldatensätze

$$\left(x_j, \Phi_{jk}^{(i)} \right)^T$$

die arithmetischen Mittel

$$\left(x_j, \bar{\Phi}_j^{(i)} \right)^T$$

verwendet. Diese Vorgehensweise eignet sich, da durch lineare Regressionsmodelle insbesondere Erwartungswerte geschätzt werden. Somit erhält man das Minimierungsproblem:

$$\min_{a_i \in \mathbb{R}^{15}} \left\{ \left\| \begin{pmatrix} \bar{\Phi}_1^{(i)} \\ \vdots \\ \bar{\Phi}_u^{(i)} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} r(x_1)^T \\ \vdots \\ r(x_u)^T \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1^{(1)} \\ \vdots \\ a_1^{(15)} \end{pmatrix} \right\|_2^2 \right\} \quad (24).$$

Es sei \bar{a}_i der optimale Punkt des quadratischen Minimierungsproblems aus Gleichung (24), ferner gelte:

$$\hat{y}_i := \begin{pmatrix} r(x_1)^T \\ \vdots \\ r(x_u)^T \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{a}_i^{(1)} \\ \vdots \\ \bar{a}_i^{(15)} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^u \quad (25),$$

$$\bar{y}_i := \frac{1}{u} \cdot \sum_{j=1}^u \bar{\Phi}_j^{(i)} \in \mathbb{R} \quad (26).$$

Zur Validierung des Regressionsansatzes wird ein Bestimmtheitsmaß R^2 berechnet gemäß

$$R^2 := \frac{\sum_{j=1}^u \left(\hat{y}_i^{(j)} - \bar{y}_i \right)^2}{\sum_{j=1}^u \left(\bar{\Phi}_j^{(i)} - \bar{y}_i \right)^2} = \frac{\hat{y}_i^T \hat{y}_i - u \bar{y}_i^2}{\bar{\Phi}^{(i)T} \bar{\Phi}^{(i)} - u \bar{y}_i^2} \quad (27)$$

mit

$$\bar{\Phi}^{(i)} = \begin{pmatrix} \bar{\Phi}_1^{(i)} \\ \vdots \\ \bar{\Phi}_u^{(i)} \end{pmatrix} \quad (28).$$

Je näher R^2 bei 1 liegt, desto besser wird die abhängige Variable durch die unabhängigen Variablen dargestellt ($0 \leq R^2 \leq 1$).

Zusätzlich wird ein Maximum $E_{\max}^{(i)}$ für einen Absolutwertes der Abweichung der Daten vom Modell angegeben als

$$E_{\max}^{(i)} := \max_{j=1, \dots, u} \left\{ \left| \bar{\Phi}_j^{(i)} - \hat{y}_i^{(j)} \right| \right\} \quad (29).$$

$E_{90\%}^{(i)}$ ist derjenige Wert, unterhalb dessen mindestens 90% der Absolutwerte der Abweichungen der Daten vom Modell liegen. Analog dazu ist $E_{80\%}^{(i)}$ derjenige Wert, unterhalb dessen mindestens 80% der Absolutwerte der Abweichungen der Daten vom Modell liegen. Mit dem optimalen Punkt \bar{a}_i des Minimierungsproblems gemäß Gleichung (24) läßt sich ein Modell $\Phi^{(i)}$ des Erwartungswertes der Meßgröße $\Phi^{(i)}$ angeben zu

$$\Phi^{(i)} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \quad (30),$$

$$x \mapsto \bar{a}_i^T r(x) \quad (31).$$

Insbesondere läßt sich der Gradient $\nabla \Phi^{(i)}$ analytisch angeben mit

$$\nabla \tilde{\Phi}^{(i)}(x) = \frac{dr}{dx}(x) \cdot \bar{a}_i \quad \text{für alle } x \in \mathbb{R}^n \quad (32).$$

60

Patentansprüche

1. Verfahren zum Entwurf eines technischen Systems,
 - a) bei dem Meßdaten eines vorgegebenen Systems anhand eines Ersatzmodells beschrieben werden;
 - b) bei dem eine Maßzahl für die Güte des Ersatzmodells ermittelt wird, indem die Meßdaten des vorgegebenen Systems mit durch das Ersatzmodell bestimmten Daten verglichen werden;
 - c) bei dem aus der Maßzahl für die Güte des Ersatzmodells dahingehend angepaßt wird, daß es eine möglichst hohe Güte aufweist;

- d) bei dem das hinsichtlich seiner Güte angepaßte Ersatzmodell zum Entwurf des technischen Systems eingesetzt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem das Ersatzmodell ein Regressionsmodell ist.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem die Güte anhand einer quadratischen Abweichung der Meßdaten von den durch das Ersatzmodell bestimmten Daten ermittelt wird. 5
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Meßdaten nach deren Güte, bezogen auf deren Abweichung von den durch das Ersatzmodell bestimmten Daten, sortiert werden und eine vorgegebene Anzahl von n% schlechtesten Meßdaten aussortiert werden.
5. Verfahren nach Anspruch 4, bei dem die n% schlechtesten Meßdaten nicht aussortiert werden, wenn sie in einem zusammenhängenden Bereich liegen. 10
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Menge der Meßdaten im Rahmen einer Vorverarbeitung reduziert wird.
7. Verfahren nach Anspruch 6, bei dem die Vorverarbeitung eine Klasseneinteilung der Meßdaten umfaßt.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die mittels Entwurf gewonnenen Daten zur Steuerung einer technischen Anlage eingesetzt werden. 15
9. Verfahren nach Anspruch 8, zur Online-Anpassung der Steuerung für die technische Anlage.
10. Anordnung zum Entwurf eines technischen Systems, mit einer Prozessoreinheit, die derart eingerichtet ist, daß
- a) Meßdaten eines vorgegebenen Systems anhand eines Ersatzmodells beschreibbar sind;
- b) eine Maßzahl für die Güte des Ersatzmodells ermittelbar ist, indem die Meßdaten des vorgegebenen Systems mit durch das Ersatzmodell bestimmten Daten verglichen werden; 20
- c) aus der Maßzahl für die Güte des Ersatzmodells dahingehend anpaßbar ist, daß es eine möglichst hohe Güte aufweist;
- d) das hinsichtlich seiner Güte angepaßte Ersatzmodell zum Entwurf des technischen Systems einsetzbar ist.

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

25

30

35

40

45

50

55

60

65

FIG 1

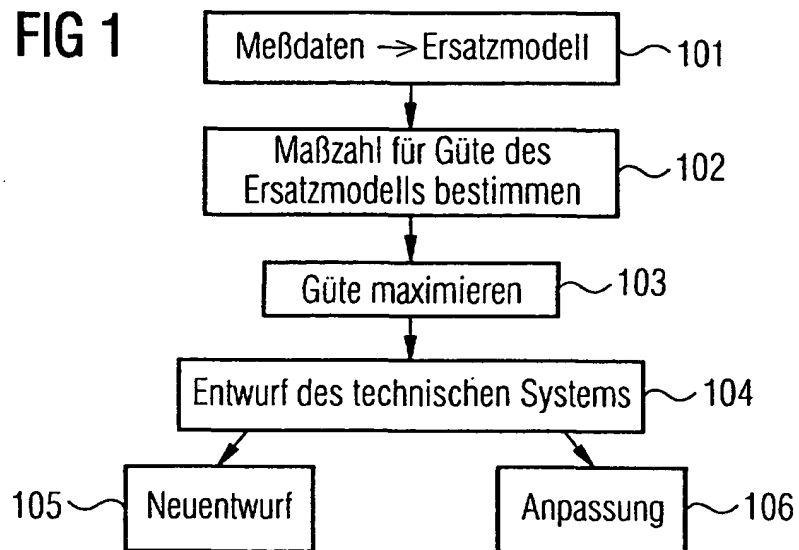


FIG 2

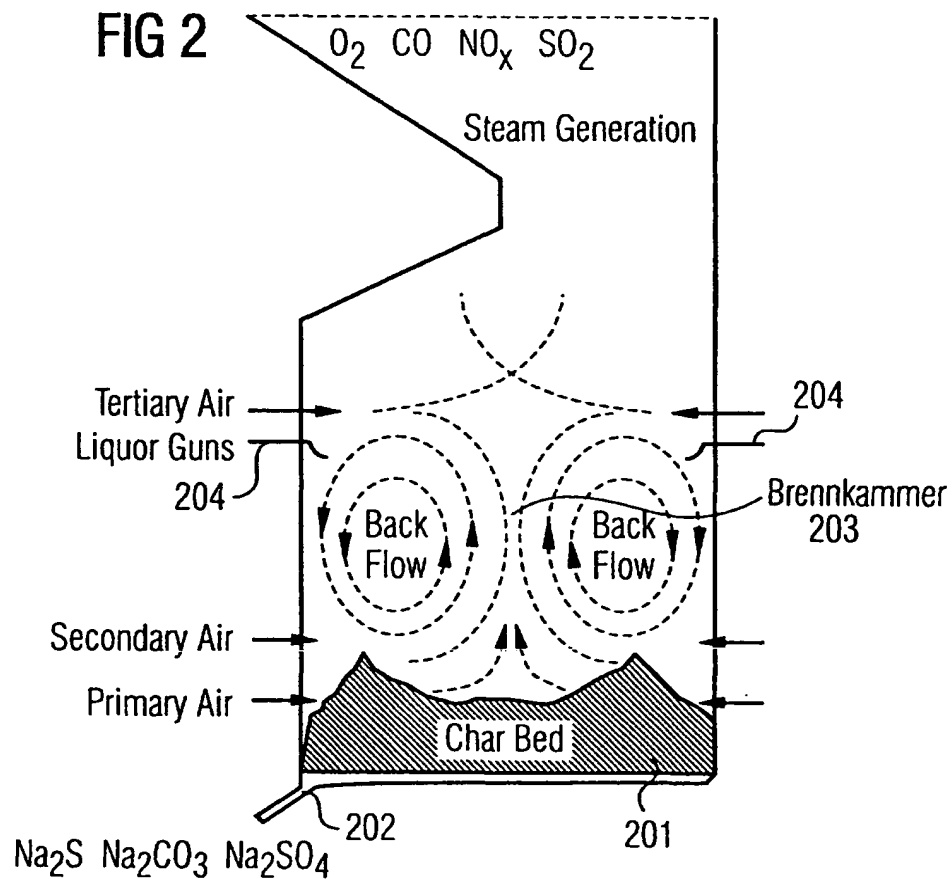


FIG 3

Eingangsgrößen		
	Meßgröße	Beschreibung
1	FI 7081	BL Flow
2	QI 7082 A	Dry Solids Content
3	FIC 7280 X	PA Primary Air
4	FIC 7281 X	SA Secondary Air
5	FIC 7282 X	TA Tertiary Air
6	PI 7283	PA Pressure
7	PI 7284	SA Pressure
8	PHI 7285	TA Pressure
9	TIC 7288 X	PA Temperature
10	TIC 7289 X	SA Temperature
11	PIC 7305 X	Press Induced Draft
12	HO 7338	Oil Valve
13	TI 7347	BL Temperature
14	PIC 7349 X	BL Front Pressure
15	PIC 7351 X	BL Back Pressure

FIG 4

Stellgrößen		
	Meßgröße	Beschreibung
1	FIC 7280 X	PA Primary Air
2	FIC 7281 X	SA Secondary Air
3	FIC 7282 X	TA Tertiary Air
4	PIC 7349 X	BL Front Pressure

FIG 5

Ausgangsgrößen		
	Meßgröße	Beschreibung
1	TIC 7249 X	Steam Temperature
2	FI 7250	Steam Production
3	QI 7322	O_2
4	TI 7323	Smoke Temperature
5	QI 7331	H_2S
6	QI 7332	SO_2
7	QIC 7333 X	CO
8	QIC 7370 X	Spec. Weight of Green Liquor
9	QI 7531	NO
10	IBM 8096	Reduction Efficiency
11	IBM 8109	PH Value
12	TI 7352	Bed Temperature
13	IBM 8015	$NaOH$
14	IBM 8016	Na_2S
15	IBM 8017	Na_2CO_3